

以高功率飛秒雷射驅動 電子加速器和超快 X 光源

文/汪治平、陳賜原、林俊元、朱旭新

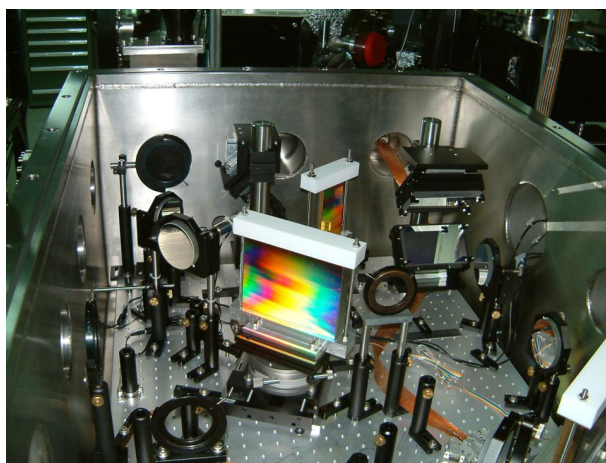
摘要

藉著高功率飛秒雷射對於電漿的強大作用力，我們可以控制電漿的時空演變，用以導引雷射，加速粒子，和產生同調(coherent)的 X 光脈衝。在雷射與電漿豐富的交互作用中，許多應用正等著我們開發。

高功率飛秒雷射

飛秒(10^{-15} 秒)雷射技術的快速發展始於 1980 年代中期。利用染料雷射的寬頻特性和共振腔內的非線性效應，雷射可以自發產生短於 10^{-13} 秒的脈衝。1990 年代初期幾個研究團隊陸續證明了克爾(Kerr)效應可以在固態雷射中壓縮脈衝。利用這個方法，幾乎任何固態雷射都可以自發產生脈衝，其脈衝的長度則受限於雷射的增益頻寬和高階的群速度色散(group-velocity dispersion)。到了 1990 年代中期，內建高階色散補償的寬頻鏡片問世，配合增益頻寬高達 300 nm 的 Ti:sapphire 晶體，使得雷射可以直接產生短於 10^{-14} 秒的脈衝。飛秒脈衝放大技術從 1980 年代末期開始也有極大的進展，其中最重要的突破是線性變頻放大技術(chirped-pulse amplification)。雷射放大器的極限在於放大器介質的非線性效應和強光導致的游離損壞。Strickland 和 Mourou 發明的線性變頻放大技術是利用光纖或光柵所提供的大量群速度色散，將脈衝拉長數千倍，放大後再以反向的群速度色散將脈衝壓縮回原來的長度。這使得脈衝在放大器內的照度降低了數千倍，因此提升了放大器的極限倍率達數千倍[1]。利用這個技術，可以在小型的實驗室內將飛秒雷射脈衝放大十億倍，達到十兆瓦的瞬間功率。這樣的脈衝聚焦後瞬間照度達到 10^{23} W/m²，是正午日照的 10^{20} 倍！過去幾年我們在中央研究院原子與分子科學研究所建造了一部高性能的十兆瓦雷射，其脈衝品質和穩定性領先全球[2]。藉著這樣的雷射，我們得以精密控制雷射與電漿的交互作用，驅動電子加速器

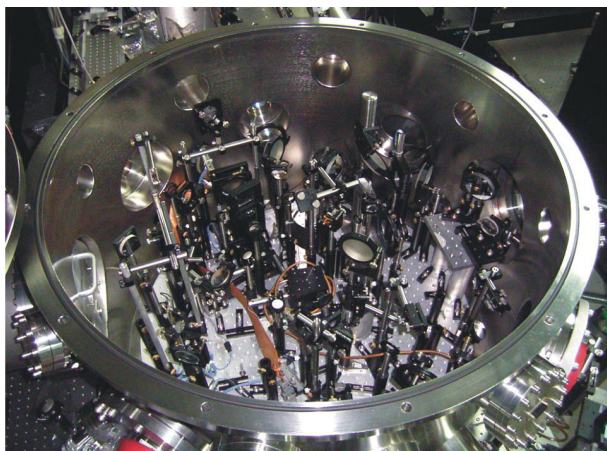
和超快 X 光源。



以光柵組成的雷射脈衝壓縮器

在 10^{23} W/m² 的強大電磁場下，任何物質都會被瞬間游離成為電漿。在短時間內雷射的有質動力(ponderomotive force)推動電子與正離子分開，在電漿中形成尾波。如果雷射脈衝的時間長度大於電漿振盪的週期，拉曼(Raman)效應也會造成電漿波的成長。我們可以控制雷射的波形來配合電漿的振盪，以產生想要的電漿波的形態。電漿波中的強大電場可以用來加速電子或質子；而在適當的條件下電漿波本身也可以使雷射脈衝在空間上聚焦，同時在時間上壓縮，產生更集中的光場分布。如果使用圓偏極的雷射脈衝來游離氣體，游離出的電子可以獲得大量的動能，這些熱電子可以將離子激發到高能態，形成 X 光雷射。在比較長的時間尺度下來看，雷射脈衝驅動電子同步振盪，電子與離子的碰撞使得電漿的溫度升高。電漿受熱後膨脹逸散，形成局部的瞬態空洞。藉由控制雷射

的空間分布，我們可以利用這個機制製作瞬態電漿器件，以達成應用的目的。以下我們將分別介紹高功率飛秒雷射驅動的電子加速器，超快 X 光源，和瞬態電漿器件的製作和應用。



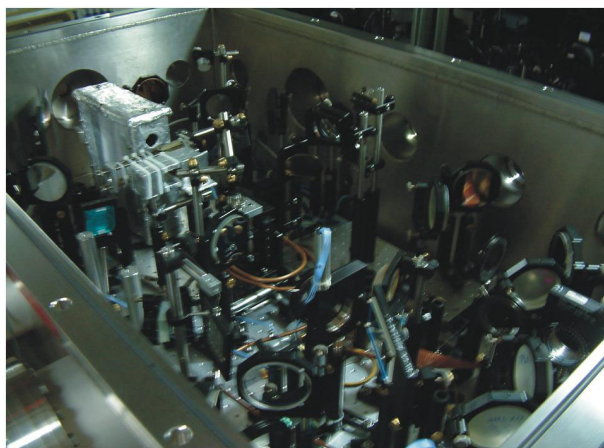
真空腔中的 X 光雷射

電子加速器

自從 1911 年拉塞福爵士以放射性元素發出的高速阿爾發粒子撞擊原子，發現了原子的內部結構，高速粒子就一直是推動基礎物理發展的重要工具。物理學家利用高速粒子來探測原子的內部結構，不只發現原子內有原子核，而且原子核內堆滿核子，核子內還有夸克。藉著研究基本粒子的交互作用，物理學家逐步理解物質的基本構造，甚至能藉此推測宇宙形成的過程。在這段發展期間，加速器所產生的粒子的能量也從百萬電子伏特等級逐步躍升為兆電子伏特等級，加速器的尺度也從數公尺增加到幾十公里。

不僅是基礎物理，加速器在應用物理上和醫學上也是非常重要的工具。同步輻射和自由電子雷射都是以加速器為基礎，它們能夠產生純淨而且高亮度的 X 光，作為解析物質結構甚至分子運動和化學反應的利器，也是以蝕刻法製作奈米尺度元件所需的光源。在國家級醫療中心加速器用於製作半衰期很短的同位素，這些同位素可以幫助檢驗和治療癌症，也用於斷層造影。加速到一、兩億電子伏特的質子，更是目前傷害最小的放射治療射源。

傳統的加速器使用低頻率的電磁波來加速。受限於加速器內微波共振腔的崩潰電場，每公尺只能加速約一億電子伏特。要加速到兆電子伏特等級，加速器的長度就必須大於十公里。使用環形的加速器雖然能節省空間，但是要讓帶電粒子在環形軌道高速運動，必須給與很大的向心加速度。向心加速度會使帶電粒子發出輻射而損失能量，因此愈來愈難加速。目前最強大的加速器其建造和運轉費用已經達到社會願意負擔的極限（雖然比起軍備的花費是九牛一毛），因此全世界已經很多年未興建全新的加速器，這就對基礎物理的持續發展形成了限制。以產生 X 光或醫學應用為目的的加速器，也同樣因為費用的問題，難以普及化。因此，發展新的加速方法是實驗物理領域的一個重要的課題。



雷射電漿波電子加速器

雷射能夠產生強烈的光波；光波是高頻率的電磁波，與電子有強烈的交互作用。比起微波，雷射因為波長很短，能夠聚焦到非常小的一點，使得照度大幅提高。另一方面，雷射也能產生非常短的脈衝，使得瞬間功率也大幅提高。因此一個高功率的短脈衝雷射聚焦後，焦點附近的電場極為強大，遠超過微波所能達到的強度。然而雷射的電場幾乎與行進方向垂直，因此不便持續的直接加速電子。1979 年 Tajima 和 Dawson 提出了使用雷射來驅動電漿波，再用電漿波來加速電子的概念[3]。因為電漿波的電場方向與行進方向一致，電子被電漿波推動，如同衝浪者被海浪推動一樣，只要電子還在有加速作用的相位，加速就可

以持續進行。這種加速方式可以產生每公尺一千億伏特的加速電場，比起微波加速大了一千倍，相當於將一公里的加速器縮小到一公尺，如果真能實行，對於加速器科技將有革命性的影響。然而當時的雷射所能達到的功率不夠大，脈衝的長度也不夠短，這個概念直到 1990 年代中期才得到初步的驗證。

雷射驅動電漿波電子加速器所面臨的挑戰有三：(1)如何讓雷射聚焦後不散開，繼續傳播一段足夠的距離，以便持續驅動電漿波。(2)如何侷限電子的加速方向，以獲得狹窄的電子束。(3)如何注入電子，以產生飛秒等級的電子團，並使得電子得到整齊的加速，以獲得狹窄的能量分布。我們正運用雷射控制電漿的技術，來面對這些挑戰。首先，利用一個短而強的前置脈衝，加上圓錐透鏡聚焦到一個縱向線形的區域，可以預先在該線形區域游離氣體，產生自由電子。接著以一個長脈衝驅動自由電子，使它們長時間高速振盪，撞擊離子，造成局部加熱和更多游離。熱電子往外擴散，並拖著離子往外移動，造成中心的電漿密度下降，而周邊的電漿密度卻因為往外衝的電子與中性原子碰撞，產生新的游離而升高。電漿密度低的區域所對應的折射率高，形成波導效應，因此可以導引雷射保持高照度、長距離傳播[4]。一旦雷射脈衝進入預先形成的波導，所產生的有質動力(ponderomotive force)會將電子暫時排開，在波導中短暫形成帶正電的通道，這個正電通道會防止後面被電漿波加速的電子散開，因此可以得到狹窄的電子束。利用這些新技術，我們可以在一毫米的距離將電子加速到五千萬電子伏特，而發散角小於 0.2 度。在電子注入技術上，我們發展了定時、定點的注入方法，領先世界上其他團隊。我們使用一個短而強的前置脈衝來產生種子電漿波，藉由拉曼前向散射，這個種子電漿波會被主脈衝放大，與前置脈衝同步。另一方面，種子電漿波也藉由拉曼背向散射注入電子，這些電子被放大的電漿波加速，也是與前置脈衝同步。這是一種時間定位注入的技術[5]。我們把上述產生波導的技術用於垂直於雷射傳播的方向，可以在雷射產生的電漿通道上開闢一個密度陡坡，當電漿波通過這個密度

陡坡時，因相位急速改變而注入電子。這是一種空間定位注入的技術[6]。如果能把這兩類技術與上述的電漿波導技術結合，就能達成一個接近理想的前級加速器。

我們的電子團含有約 10^{10} 電子，與同步輻射加速器的電子團相當。若以相同原理建造後級加速器，將這些電子加速到十億電子伏特等級，我們目前的雷射能量明顯不足，因此建造更大的雷射勢在必行。限於原分所的實驗室空間，我們將在中央大學建造 100 兆瓦級的雷射。如果能獲得十億電子伏特的電子團，只要加上磁場，就有了桌上型的同步輻射。另一方面，將十億電子伏特的電子團以小角度注入預先形成的正電電漿通道，電子會產生橫向振盪，振盪發出的輻射同相相加，就有了桌上型的自由電子雷射。如果將飛秒雷射脈衝與十億電子伏特的電子團對撞，藉由都卜勒效應可以得到千萬電子伏特的定向伽瑪射線，其脈衝寬度短於 10^{-14} 秒，能量可連續調整。這樣的光源可以用來探測核子能階和操縱核反應，正如可見光和紅外光波段的雷射可以探測原子、分子能階並操縱其反應。這方面的技術發展也許足以開啓一個核子物理研究的新時代。

雷射驅動電漿波電子加速器目前最高能量的實驗記錄是在數毫米內將 3×10^9 個電子加速到近兩億電子伏特，能譜寬度約 10% [7]。以較低的能量在電漿波導中加速，也已經證實可以得到近一億電子伏特的電子和 2% 的能譜寬度[8]。這樣的加速技術是否能夠延伸到數十億電子伏特等級，取代同步輻射加速器，甚至延伸到十兆電子伏特等級，突破高能物理在加速器技術上的困境？這裡牽涉到兩個不同類型的問題：(1)目前的高功率雷射是用 Nd:YAG 倍頻雷射來激發，受限於 Nd:YAG 倍頻雷射的總體激發效率和散熱率，每秒鐘只能發射十次。對於注重通量的應用，這樣的發射速率比起傳統加速器差了很多。即使不考慮通量的問題，將 10^{10} 個電子加速到 10^{13} 電子伏特，僅僅是電子的動能就高達一萬六千焦耳，因此雷射脈衝的總能量可能需要數萬焦耳以上，對於目前的飛秒雷射科技，這是一個極大的挑戰。要解決這個問題，必

須開發能夠使用半導體雷射激發的高功率雷射介質，同時降低半導體雷射的製造成本。法國的國家實驗室已經在這個方向上投入大量的資金和人力。(2)使用電漿波加速電子，電漿的密度要大，加速力才大。然而雷射脈衝在高密度電漿中行進的速度低於光速，因此當電子被加速到接近光速時，雷射會跟不上電子，也就無法繼續加速。這就限制了每個階段加速器的加速距離，也就限制了每個階段的能量增益。如果不解決這個問題，假設每個階段加速器能提供兩億電子伏特，那麼就需要五萬個加速器串連才能得到十兆電子伏特，這就不樂觀了。因此如何在同一個加速器內重新調整電子與電漿波的相對相位，使得電子能利用電漿波的不同週期多次加速，是一個值得研究的問題。我們相信利用預先製作的週期性電漿結構，可以破壞加速週期和減速週期之間的平衡，讓電子能持續加速，這正是我們目前努力的方向。

雷射驅動電漿波電子加速器是一個年輕的研究領域，未來能不能長大，成為人類科技史的里程碑之一，目前很難預測。如果能夠發展成功，它有可能改變整個基礎物理和輻射科技的前景，因此這是一個值得重視和投入的領域。

超快 X 光源

自從倫琴(Roentgen)在 1895 年發現 X 光以來，與 X 光有關的研究工作已經得到了 11 次諾貝爾獎，X 光在科學上的重要性不言而喻。雷射的發明使得光學技術獲得驚人的進展，到現在已經是科學上最普遍的分析工具。如果想要將這些美妙的光學技術延伸到 X 光的區域，就必須發展與雷射類似的 X 光源。但是傳統雷射的頻率受制於原子與分子外層電子的能階差距，很難超過紫外光的範圍，目前同調性較好的 X 光源是同步輻射，然而其建造和經營的成本都很高，廣泛的應用有困難。高功率飛秒雷射能夠用來操縱電子的運動，也就能控制電子的輻射。高功率飛秒雷射所產生的 X 光脈衝其長度也非常短，相較於其他 X 光源有很高的時間解析能力，因此在瞬態分析上獨具優勢。

利用高功率飛秒雷射來產生超快 X 光有三種方式：X 光雷射，高階諧波，和自由電子雷射。X 光雷射與傳統雷射的原理相同，只是能階的差距增大了很多倍。將能階差距增大的辦法是將原子游離掉很多個電子，使它看起來像是原子序比較低的原子。但是因為原子核內的正電並未減少，所以電子的位能陷的更深。能階的差距與核內正電的平方成正比，所以游離 n 個電子，就能將能階差距拉大 n^2 倍，雷射的頻率也就增加了 n^2 倍。但是要把原子游離掉很多個電子，如果是電子碰撞來達成，所需的溫度很高。如果是以外加電場來達成，所需的電場也很強。另一方面，高能階的電子容易自發性的往下躍遷，生命期很短，必須在很短的時間內完成激發。高功率飛秒雷射可以產生高熱電漿，雷射本身的電場也夠強，脈衝很短，所以適合用來驅動 X 光雷射。最近我們已經在氬氣噴流中產生 41.8 nm 的雷射，達到飽和輸出[9]。

X 光雷射所面臨的挑戰有二：(1)如何提升效率。目前 X 光雷射的效率約為 10^{-6} ，大部分的能量都用來加熱電子而非產生 X 光。熱電子的能量分布很寬，只有少數能轉到離子的高能階激發態。(2)如何縮短波長。以顯微術的應用來說，波長在 2.5 nm 到 4 nm 之間的光子比較不會被氧吸收，卻會被碳吸收，因此特別適合用來穿過充滿水份的細胞，觀察其中含碳的細微組織。用於繞射實驗以決定分子結構的 X 光，需要的波長短於 0.1 nm，就連同步輻射也不容易產生這麼短的波長。以 X 光雷射來產生 2.5 nm 到 4 nm 的光子，需要用到深層的核心電子，如何游離到這麼深層，游離後又如何控制電子的能量範圍，使它們能有效的轉為離子的高能階激發態，都是待解決的問題。

當原子、原子團、或電漿受到高功率雷射的照射，其中的電子會隨著電場強烈振盪。當電場的強度足以使電子從原子或原子團游離，或在電漿中使電子的振盪速度接近光速，電子的運動就有很大的非線性成份，因而輻射出高階諧波，其諧波階數可高達數百，也就是頻率為驅動雷射的數百倍。在這個過程中，電子的運動是規律的而非隨機碰撞，因此理論上

能量轉換的效率可以很高。然而由於折射係數隨頻率而變，雷射光與高階諧波的相速度(phase velocity)不同，傳播一段距離後雷射與高階諧波的相位顛倒，能量反而從高階諧波還給了雷射，這就限制了高階諧波的轉換效率。這個相位匹配的問題和電子加速器類似。我們相信利用預先製作的週期性電漿結構，可以破壞高階諧波成長週期和衰減週期之間的平衡，讓高階諧波能持續成長，這也是我們目前努力的方向。

當高功率雷射脈衝通過電漿時，其有質動力將電子排開，在電漿中開闢一個電子匱乏的通道。這個通道佈滿正離子，可以同時導引光束和電子束的傳播。受到正離子的吸引，電漿波所加速的電子在這種通道中可以進行橫向的振盪運動，並發出輻射。當發出的輻射沿著通道同相相加時，就產生了自由電子雷射。這個方法是利用電場而非磁場來誘導電子的運動，因此不需要超導磁鐵陣列。電漿通道的寬度只有數十微米，長度只有數毫米，比起傳統的自由電子雷射縮小了 1000 倍。與 X 光雷射和高階諧波不同的是，這個方法可以輕易產生 0.1 nm 等級的同調 X 光脈衝，與它們成互補的架構。目前已有實驗證實這個構想，但是初步展示的效率很低[10]，這是因為所用的電子束在空間上不夠集中，能量分布也太大，並且離子通道的長度也不夠。這三個問題是電子加速器的問題而非自由電子雷射的問題。一旦我們在電子加速器的發展上達成了時空定位注入電子和在電漿波導中加速的目標，這些問題將迎刃而解。

瞬態電漿器件

在電子加速器的段落中，我們已經談到了如何以局部游離－加熱－擴散的三段過程來製作電漿波導。如果把游離和加熱的光束改為橫向通過主脈衝的路徑，並加上光罩來調制其強度分布，就可以製作任意的電漿結構。我們用這個方法已經展示了週期性的電漿結構[11]，下一步就是用它來解決電子加速器和高階諧波的相位匹配問題。另一方面，游離原子團(atomic clusters)所產生的奈米電漿球也是一個引人遐

思的瞬態電漿系統。當氣體從高速噴嘴中噴出時，絕熱膨脹使得氣體急速冷卻，形成奈米尺度的原子團。原子團被雷射游離，形成奈米電漿球(nano-plasma)，其電漿隨雷射的電場振盪。從大範圍來看，這種電漿球所形成的氣體其折射率隨時間快速改變。游離之前其折射率接近 1，游離後電子的振盪脫離了個別的原子的束縛，振盪的範圍變大，折射率隨之增加。此時電漿球持續膨脹，直到電漿平均密度約等於共振密度時折射率再度回到 1，然後逐漸降低，直到變成均勻電漿，此時折射率已經小於 1。因為電漿球被加熱膨脹的速度隨雷射的強度而變，因此利用雷射的強度分布可以控制折射率的瞬態空間分布，也就是製作瞬態光學元件。我們已經展示了利用這種原理所得到的瞬態電漿透鏡[12]。瞬態光學元件的折射率的快速改變也可以用來調變雷射的頻率，因為相位改變對時間的第一階導函數就是頻率的改變。傳統的相位調變器使用電光效應，因為外加電壓的改變最快也只有 10^{-9} 秒的尺度，無法快速調變光波。瞬態光學元件的調變速度在 10^{-12} 秒時間尺度，配合電漿本身的群速色散，可以用來壓縮雷射脈衝，甚至可以用來製作光波的時間顯微鏡，將飛秒尺度的波形放大為奈秒尺度[13]。

結語

實驗物理的終極精神，一方面是發現或確認新的物理定律，另一方面是找出控制物質世界的方法，而這兩者往往互為因果。例如望遠鏡和顯微鏡是控制光波的方法，藉著觀測行星的運動，前者導致萬有引力的發現；藉著觀測花粉在水中的運動，後者決定了亞佛加厥(Avogadro)數，確認了原子的理論。而原子的理論又反過來發明了雷射，讓我們得到了控制光波更高明的方法。雷射又被用於冷卻原子，讓我們得到了玻色－愛因斯坦凝聚體。這是一個量子場最方便的實驗平台，等於是物質波的“雷射”。整個人類的科學文明，就是建築在這個互為因果上。我們以高功率飛秒雷射操控電漿，製作電子加速器和超快 X 光源，近程的意義是它們在科學發展上有立即且重要的應用，而遠程的意義更是我們要控制電子的運動和輻射到前

人所不能想像的地步，提供後人更進一步探索的跳板，正如雷射的發明人當年無法想像今天的雷射可以產生如此強大的電場，足以改變加速器的發展方向。這樣的期許，也許就是一種科學研究的原動力吧！

參考論文

- [1] D. Strickland and G. Mourou, Optics Communications **56**, 219 (1985).
- [2] H.-H. Chu, S.-Y. Huang, L.-S. Yang, T.-Y. Chien, Y.-F. Xiao, J.-Y. Lin, C.-H. Lee, S.-Y. Chen, and J. Wang, Applied Physics B **79**, 193 (2004).
- [3] T. Tajima and J. M. Dawson, Physical Review Letters **43**, 267 (1979).
- [4] Yi-Fang Xiao, Hsu-Hsin. Chu, Hai-En Tsai, Chau-Hwang Lee, Jun-Yuan Lin, Jyhpyng Wang, and Szu-Yuan Chen, Physics of Plasmas **11**, L21 (2004).
- [5] Wei-Ting Chen, Ting-Yei Chien, Chau-Hwang Lee, Jun-Yuan Lin, Jyhpyng Wang, and Szu-Yuan Chen, Physical Review Letters **92**, 075003 (2004).
- [6] Ting-Yei Chien, Chun-Lin Chang, Chau-Hwang Lee, Jun-Yuan Lin, Jyhpyng Wang, and Szu-Yuan Chen, Physical Review Letters **94**, 115003 (2005).
- [7] J. Faure et al., Nature **431**, 541 (2004).
- [8] C. G. R. Geddes et al., Nature **431**, 538 (2004).
- [9] H.-H. Chu, H.-E. Tsai, M.-C. Chou, L.-S. Yang, J.-Y. Lin, C.-H. Lee, J. Wang, and S.-Y. Chen, Physical Review A **71**, 061804(R) (2005).

- [10] Antoine Rousse et al., Physical Review Letters **93**, 135005 (2004).
- [11] C.-H. Pai, S.-Y. Huang, C.-C. Kuo, M.-W. Lin, J. Wang, and S.-Y. Chen, Physics of plasmas **12**, 070707 (2005).
- [12] Hsu-Hsin. Chu, Hai-En Tsai, Yi-Fang Xiao, Chau-Hwang Lee, Jun-Yuan Lin, Jyhpyng Wang, and Szu-Yuan Chen, Physical Review E **69**, 035403(R) (2004).
- [13] C. V. Bennett and B. H. Kolner, Optics Letters **24**, 783 (1999).

作者簡介

汪治平

中央研究院原子與分子科學研究所

jwang@lml.iam.s.sinica.edu.tw

陳賜原

中央研究院原子與分子科學研究所

syichen@lml.iam.s.sinica.edu.tw

林俊元

中正大學物理系

jylin@phy.ccu.edu.tw

朱旭新

中央大學物理系

hhchu@ncu.edu.tw